

J-PARC イオン源での 90mA 負水素イオンビーム試験

90mA NEGATIVE HYDROGEN ION BEAM EXPERIMENTS AT J-PARC ION SOURCE

柴田崇統^{#,A)}, 南茂今朝雄^{A)}, 大越清紀^{B)}, 神藤勝啓^{B)}, 飛田健太郎^{C)}

Takanori Shibata^{#,A)}, Kesao Nanmo^{A)}, Kiyonori Ohkoshi^{B)}, Katsuhiro Shinto^{B)}, Kentaro Tobita^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{C)} Nuclear Engineering Co. Ltd. (NECO)

Abstract

Beam power improvement is one of the essential tasks in the next J-PARC accelerator upgrade. The ion source is required to be able to supply sufficient and stable negative hydrogen ion (H^- ion) beam to the accelerators. For this purpose, high intensity experiments were conducted at the ion source test stand (IS-TS). A 90-mA and 52.5-keV negative hydrogen ion (H^- ion) beam has been extracted from the J-PARC Radio Frequency (RF) -driven H^- ion source (IS). From the measurement at IS-TS, reasonable increase in the operation parameters (the RF input power to the ion source, the electrostatic voltage for beam extraction, and the solenoid currents for Twiss matching) was observed compared with the present 60-mA beam condition. The normalized RMS emittance increased by a little over 10 percent while the beam current increased by 50 percent. This emittance was in the acceptable range for the sequential Radio Frequency Quadrupole (RFQ) cavity. The 90-mA beam operation continued for a half day without any serious breakdowns in the RF system or the electrostatic acceleration components. The effects between the beam current and the phase-space distribution are discussed in aspect of the H^- ion beam optics.

1. はじめに

J-PARC ユーザー利用運転では、RCS (3 GeV シンクロトロン) から 1 MW の陽子ビーム強度を得るため、リニアックからピークビーム電流値 50 mA の負水素イオン (H^- イオン) ビームを、マクロパルス幅 500 μ s、繰返し 25 Hz で出力する。近年は大強度化に向けた加速器スタディが進められており、RCS で 1.5 MW の陽子ビーム連続運転を目指し、リニアックでピーク電流値 60 mA、マクロパルス幅 600 μ s、繰返し 25 Hz の H^- イオンビームを RCS に入射する試験が実施されている[1]。上記のユーザー利用運転、加速器スタディに対し、 H^- イオン源 (図1) ではそれぞれ 62.5 mA および 75.0 mA のピーク電流値を、ビームエネルギー 52.5 keV で後段の高周波四重極 (RFQ) 加速空洞に供給する[2]。イオン源と RFQ の間に位置する低エネルギービーム輸送系 (LEBT) では空間電荷により、

引出し直後のビーム輸送に揺動が生じる。そのためマクロパルス 500 - 600 μ s のビーム運転に対しては、Beam ON トリガーの 100 μ s 手前からイオン源の静電加速電圧を引き上げ、マクロパルスの先頭部を LEBT 内部に捨てることで、時間的に安定したビームのみを RFQ に入射するようにしている。

加速器スタディにおける 75.0 mA のイオン源出力は、2019 年以前にオフラインのイオン源テストスタンド (IS-TS) で再現性含め確認されており、現在の加速器スタディに要請に対応している状況である[3]。今後の J-PARC 加速器アップグレードでは、現在より高いイオン源出力が要求される。例えば、RCS から 2 MW の陽子ビーム強度を想定し、リニアックから 70 mA のピーク電流値を 700 μ s で出力する試算がある[4]。このような条件では、イオン源出力ピーク電流値で 85 mA 以上が要求される。従来の J-PARC イオン源では、同じ装置設計、同じビームエネルギー (52.5 keV) に対する最大ピーク電流値が 85 mA 以下であることから、加速器スタディが次のフェーズに移行する前にイオン源大出力試験を実施する必要がある。

世界的に見て 85 mA 以上でビーム連続運転を行う H^- イオン源は例が少ない。大強度 H^- イオン源の例として、米 BNL の Magnetron 型で 100 mA 以上の出力実績がある[5]。その一方、J-PARC や米 ORNL SNS など連続運転に使用される内部アンテナコイルを用いた高周波 (RF) 放電型イオン源では、ビームエネルギー 50 keV 前後におけるピーク電流値が 60 mA 台に留まる。しかし、RF 放電型の利点はビームの安定性が高い点である。J-PARC のように半年以上のユーザー利用運転を実施する加速器では、長期間にわたる施設利用率 (availability) やビーム性能の不変性が重要である。この点では RF 放電型が強く、 H^- イオン生成の促進に用いられる Cs (セシウム) の安定供給実績がある。そのため J-PARC では RF

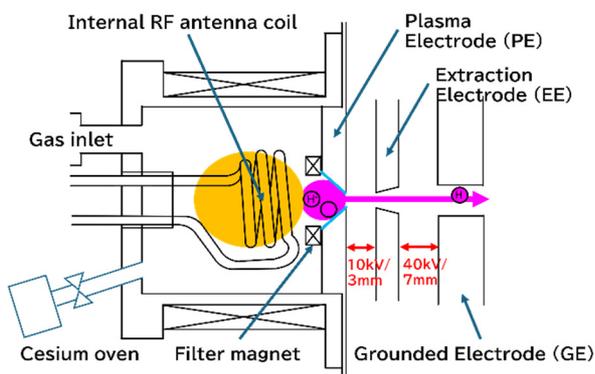


Figure 1: A schematic drawing of J-PARC ion source.

[#] takanori.shibata@kek.jp

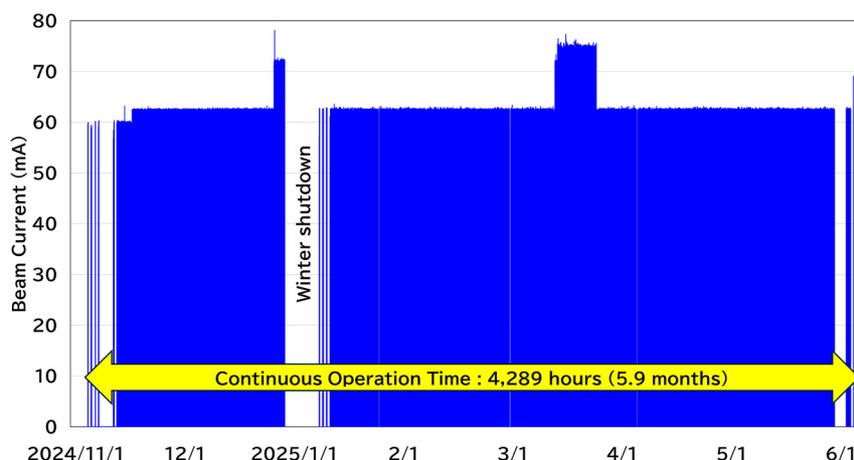


Figure 2: Beam current trend of J-PARC ion source in the user operation RUN#92 (2024/11/13 – 2025/05/24).

放電型イオン源によるビーム大強度化を目指す。

また、ビームエネルギー（静電加速電圧）を引き上げることで、イオン源内部からパルス中に引き出される H-イオン電流値を増加させることは可能であるが、高電圧電源における絶縁性能増強や後段 RFQ 仕様の変更などコストと時間を大幅に要する。リニアック全体の大強度化スケジュールに影響が出るため、ビームエネルギーは現状の 50 keV 程度に維持することが重要である。本報告では、ビームエネルギーを 52.5 keV に保ちつつ、IS-TS において実施したビーム大強度化試験結果について議論する。

2. J-PARC RF 放電型イオン源の状況

J-PARC RF 放電型イオン源の説明は文献[2, 6]などに記載されているため、本文での詳細説明は割愛する。J-PARC イオン源では、水素ガスとともに内部アンテナコイルを介して 2 MHz の RF 電力をプラズマチャンバー内部に送り込み、誘導結合型プラズマを点灯する。イオン源天板の Cs オープンから定期的に Cs 蒸気を導入することで、H-イオン生成過程を促進する。プラズマチャンバーの一端には、プラズマ電極(PE)、引出し電極(EE)、および接地電極(GE)と呼ばれるビーム引出孔の空いた電極

Table 1: Main Operation Parameters of the J-PARC RF Ion Source in the User Operation and Accelerator Study in the Actual Linac, and the High Intensity Measurement at IS-TS

イオン源 運転条件	J-PARC ユーザー 利用運転	J-PARC 加速器 スタディ	IS-TS 大強度 試験
RF 入力	30 kW	32 kW	36 kW
H ₂ 流量	21.0 sccm	21.0 sccm	19.5 sccm
引出電圧	10.3 kV	11.2 kV	10.6 kV
加速電圧	42.2 kV	41.3 kV	41.9 kV
SOL1 電流	550 A	570 A	590 A
SOL2 電流	680 A	700 A	710 A
ビーム電流	62.5 mA	75.0 mA	90.0 mA

板が取り付けられる。PE-EE 間に 10 kV の引出電圧、および EE-GE 間に 42.5 kV 前後の加速電圧を印加することで、二段加速でプラズマ中の H-イオンを引き出す。

図 2 には、2024 年 11 月から 2025 年 5 月までの J-PARC 利用運転(RUN#92)におけるイオン源運転トレンドを示した。RUN#92 における連続運転時間は 4,289 時間(約 5.9 ヶ月)である。従来はユーザー利用運転と加速器スタディ用のイオン源出力が、それぞれ 60.0 mA および 72.0 mA であったが、今回よりイオン源出力を高め、RFQ 下流の中エネルギービーム輸送系(MEBT1)に設置されたスクレーパーでビーム電流を調節することで、リニアック出力変更要請があった場合に短時間で対応できる方針とした。2025 年 3 月の加速器スタディでは、イオン源から 75.0 mA ビーム出力を 10 日間実施した。スタディ期間中、運転に影響のある放電頻度の増加やビームパラメータの時間変化は見られなかった。表 1 に、J-PARC ユーザー利用運転、および加速器スタディにおけるイオン源運転条件を示した。加速器スタディでは、ユーザー利用運転と比較して RF 入力を引き上げるとともに引出電圧を高く設定することで、多くの H-イオンをプラズマ中から引き出す設定とした。一方、ビームエネルギーの制限から加速電圧は低くなる。二段目の静電加速における空間電荷制限電流は低下するが、75.0 mA 出力には十分であった。

3. IS-TS における大強度ビーム出力試験

図 3 には大強度イオン源試験を実施するためのテスト

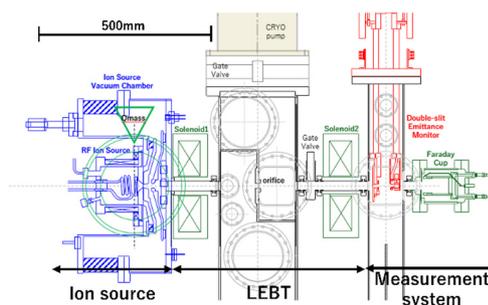


Figure 3: A schematic drawing of the IS-TS.

スタンド (IS-TS) を示した。IS-TS は、実機リニアックにおけるイオン源、および LEPT と同様の構成、寸法を取る。LEPT 容器中心には、ファラデーカップが設置され、イオン源ビーム出力電流を計測する。また LEPT にはビーム軸方向の磁場を形成するソレノイドコイルが 2 つ設置され、RFQ 入口における Twiss マッチングに用いられる。IS-TS 終端部の実機 RFQ 入口に相当する位置には、エミッタンスモニターが設置されており、イオンビームの水平・垂直方向に対する位相空間分布が得られる。

本報告の IS-TS 大強度試験では、通常の J-PARC 利用運転に対して、主に以下の点を変更している；

- H₂ ガス流量の調整
- EE-GE 間ギャップ長の変更

J-PARC 利用運転では RUN ごとのイオン源引出しビーム品質を一定に保つため、2020 年 1 月よりガス流量を 21.0 sccm に固定している。一方、パッシェン則により H₂ ガス流量は RF-ICP の温度・密度分布や点灯効率に影響する。大強度試験においては、RF 投入パワー増加に応じて、LEPT ファラデーカップ電流に対するパラメータスキャンを実施し H₂ 流量を 19.5 sccm に最適化した。これに伴い、引出電圧も通常の利用運転より低いところで最適化される設定となった。現在の J-PARC 利用運転における電極間のギャップは PE-EE 間が約 3 mm、EE-GE 間が 7 mm である。電極ギャップを狭めることで、電極間の空間電荷制限電流は増加する。一方 IS-TS 試験では、EE - GE 電極間のギャップを 8 mm と、通常 J-PARC 利用運転より 1 mm 長い条件にした。ギャップ長を長くすることで空間電荷制限電流は抑制されるものの、静電レンズの形状変化により GE 電極下流でのビーム発散角が抑えられる利点がある。これにより、空間電荷効果の高い大強度ビームの収束性を得られるようにした。LEPT ファラデーカップにおける H⁺イオンビーム電流波形を図 4 に示した。試験では表 1 に示すイオン源運転条件により、90 mA の H⁺イオンビーム電流値を確認した。また、引き出されるビームの内、EE 電極に流れ込む電流の大部分

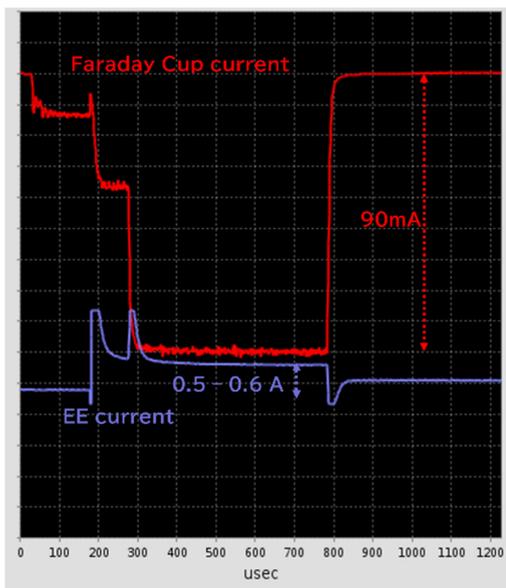


Figure 4: Waveforms of the beam current at the LEPT Faraday-Cup and the EE current.

は随伴電子に由来する。EE 電流は 0.5 - 0.6 A 程度であり、これは現在の利用運転時と近い値であった。

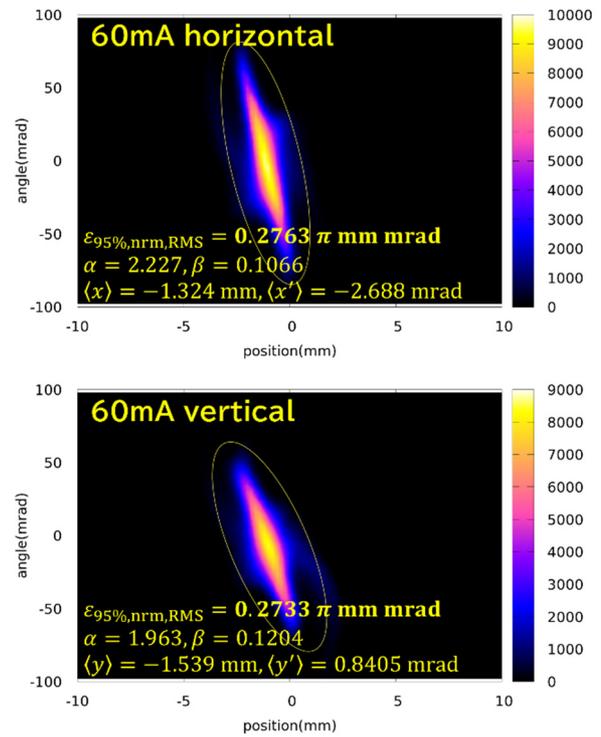


Figure 5: The 60-mA H- beam phase space distribution at the RFQ entrance in the horizontal direction (top) and in the vertical direction (bottom).

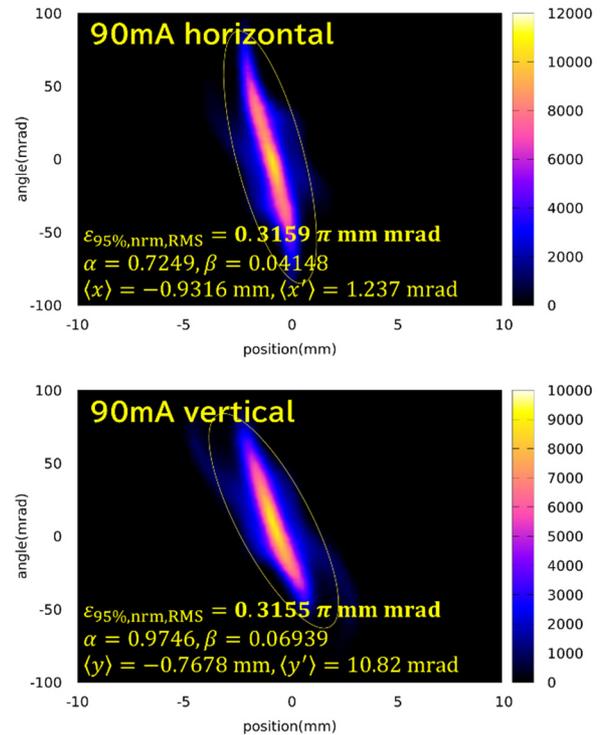


Figure 6: The 90-mA H- beam phase space distribution at the RFQ entrance in the horizontal direction (top) and in the vertical direction (bottom).

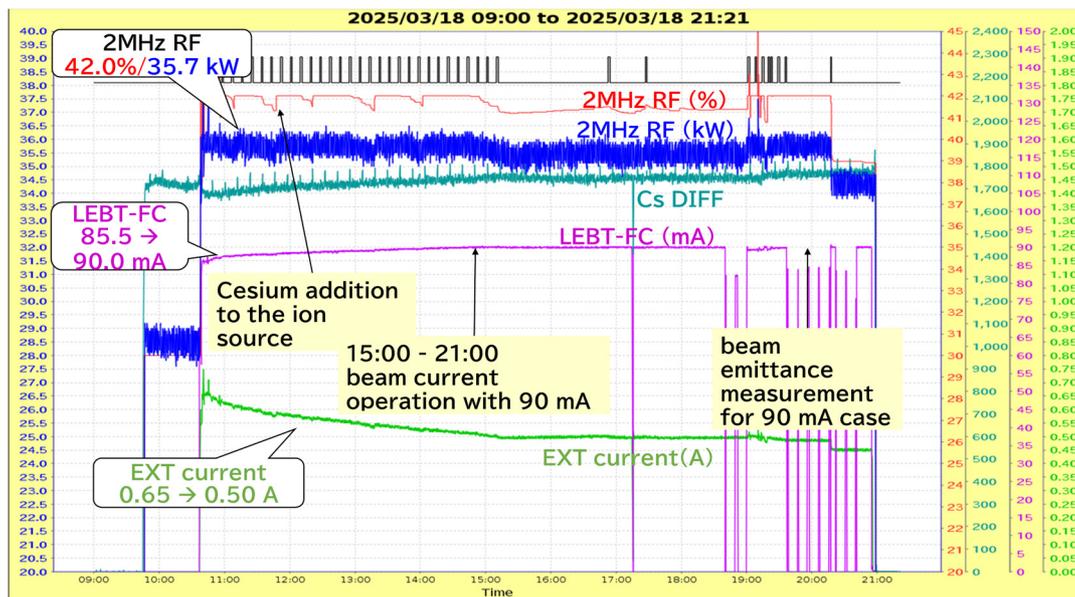


Figure 7: One-day operation trend of IS-TS high intensity experiment.

LEBT 内部の 90 mA ビーム輸送では、60 mA の場合と比較して空間電荷効果の影響が高いため、ビームは発散し易い。RFQ 入口におけるビームエミッタンスを低減するためには、LEBT 内部のビーム電流値が高いほど SOL1、および SOL2 設定は高く設定する必要がある。図 5, 6 は、60 mA および 90 mA ビーム電流試験時に測定した水平・垂直方向のビーム位相空間を示した。負イオン源では、H⁻イオンビーム引出しを促すためにイオン源および静電加速部に水平方向の磁場を形成する永久磁石が格納される。この磁場によりビーム偏向が生じることから静電加速部出口のステアリング電磁石で偏向補正を行う。この影響により、水平・垂直方向の位相空間は完全に対称ではない。60 mA ビームにおける規格化 95% RMS エミッタンスは水平・垂直方向とも 0.27 π mm mrad であるのに対し、90 mA ビームエミッタンスは、0.31 π mm mrad 程度であった。表 1 の運転条件を使用することで、ビーム電流値 50%増加に対して、エミッタンスの増加は 14%に留められる。この程度のエミッタンス増加であれば、RFQ の透過率への影響は低いと期待される。しかし、実際に RFQ に大強度ビームを入射する試験は実施していないため、今後の課題である。

上記 90 mA での出力試験は、最大で 6 時間ほどの連続運転を確認した。図 7 には連続運転のトレンドを示す。ビーム運転に影響が無い放電事象が 1 回のみあったが、電流値やビームパラメータはこの間安定に維持された。1 日以上ビーム試験が出来ない理由は、現行の IS-TS 監視体制で夜間連続運転(高圧印加)が認められていないためであり、こちらは今後モニター設置により対応する。

4. まとめ

J-PARC イオン源テストスタンドにて、RF 放電型イオン源から 52.5 keV/90 mA の H⁻イオンビームを引き出す試験を実施した。LEBT 出口における 90 mA ビームエミッタンスは、水平・垂直方向ともに 0.31 π mm mrad 程度で

あり、現在の J-PARC 利用運転における 60 mA エミッタンスの 0.27 π mm mrad から 14%程度増加した。IS-TS での大強度ビーム運転は 6 時間程度維持され、その間ビームパラメータ等の不安定性は見られなかった。本試験では、現行の RF 放電型イオン源において、静電加速部のギャップ長の変更、および H₂ ガス流量など運転条件の僅かな変更を行うのみであったことから、大規模なイオン源システムの改修を行わずにビーム強度を引き上げられることが確認された。今後の J-PARC 大強度化に向けた加速器スタディを可能とするためのイオン源課題として、数か月以上の長期間にわたる大強度ビーム引出試験、および RFQ における 0.31 π mm mrad エミッタンスビームの透過率確認を進めていく。

参考文献

- [1] Y. Liu *et al.*, “Progress in Linac Beam Commissioning for High Intensity Operations for J-PARC Power Upgrades”, the 16th International Particle Accelerator Conference (IPAC '25), 1 – 6 June 2025, Taipei, Taiwan; TUAD1.
- [2] T. Shibata *et al.*, “Operation Status of J-PARC H⁻ Ion Source”, J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 21, No.2, 2024.
- [3] T. Shibata *et al.*, “Phase Space Formation of High Intensity 60 and 80 mA H⁻ Beam with Orifice in J-PARC Front-End”, Proc. 3rd J-PARC Symposium (J-PARC'2019), JPS Conf. Proc. 33, 011010 (2021).
- [4] P. Saha *et al.*, “Beyond 1MW operation of the J-PARC RCS”, the 16th International Particle Accelerator Conference (IPAC '25), 1 – 6 June 2025, Taipei, Taiwan; TUPB003.
- [5] R. Welton *et al.*, “Negative hydrogen ion sources for particle accelerators: Sustainability issues and recent improvements in long-term operations”, J. Phys.: Conf. Ser. 2244, 012045 (2022).
- [6] K. Shinto *et al.*, “Decadal Operation of the Cesium RF-driven Ion Source for Negative Hydrogen Ions at J-PARC”, Proc. 4th J-PARC Symposium (J-PARC'2024), JPS Conf. Proc., to be published.